

薄鋼板の連続焼鈍および表面処理ラインの安定通板技術と高精度品質制御技術*

川崎製鉄技報
31 (1999) 4, 246-251

Advanced Process Control Technologies for Continuous Annealing Line and Galvanizing Line



千野 俊彦
Toshihiko Chino
千葉製鉄所 制御技術
部熱延制御課長



芹生 浩之
Hiroyuki Seriu
千葉製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査
(課長)



土田 尚史
Hisashi Tsuchida
水島製鉄所 制御技術
部制御技術室 主査
(主席掛長)

要旨

最近の 15 年間に於いて水島製鉄所、千葉製鉄所の冷間圧延工場にて多くの冷間圧延鋼板処理設備が建設されてきた。高品質で均質な製品を能率良く安定的に製造することを目的として、種々の高精度制御技術を開発し各設備に適用してきた。特に力を入れて開発してきた技術は、焼鈍炉内の板温制御、溶融亜鉛めっきおよび多目的塗装設備でのめっきおよび塗料の付着量制御、そして各設備安定通板のための鋼板の張力制御などである。これらの技術は現在においても世界のトップレベルに位置し、各設備の現在の高品質、高安定生産に貢献している。

Synopsis:

Kawasaki Steel has constructed many facilities for 15 years to produce cold rolled products and galvanized products in Mizushima Works and Chiba Works. To efficiently and stably produce high and uniform quality products, various new control methods have been developed and applied to these new facilities. Especially, temperature control in a continuous annealing line, zinc coating control in a continuous galvanizing line or paint coating control in a multi-purpose coating line and tension control to achieve stable processing are the most advanced technologies and are introduced in this paper.

1 緒 言

高品質で均質な製品を能率良く安定的に製造するために、計測・制御技術の果たす役割は近年一層重要になってきている。最近の 15 年間に於いて水島製鉄所、千葉製鉄所の冷間圧延工場にて多くの冷間圧延鋼板の処理設備が建設されてきた。これらの建設の中で、上述の要求を満たすために当社ではその時々で最新の制御方法を開発し、各設備に適用してきた。その中でも特に力を入れて開発してきた焼鈍炉内の鋼板の温度制御、溶融亜鉛めっき設備および多目的塗装設備でのめっきおよび塗料の付着量制御、そして安定通板のための鋼板の張力制御について紹介する。

2 連続焼鈍炉の板温制御

連続焼鈍設備における板温制御は、加熱温度、均熱時間、冷却速度、過時効温度、過時効時間などを所定の値に保ち、所定の品質を得ることを目的としている。この制御対象に関する特徴を以下に示す。

(1) 加熱帯、均熱帯は輻射管（ラジアントチューブ）による加熱

のため、応答時間が大きい。(63% 応答で約 13 s)

(2) 冷却帯はガスジェット冷却および、ロール冷却が一般的で、ガスジェット冷却は対流伝熱であり、ロール冷却は接触熱伝達であり、応答は加熱帯に比べ、十分速い。

1980 年代において、焼鈍炉の高速化、製品の小ロット化が進み、焼鈍炉加熱帯、均熱帯での温度制御の応答を速めるニーズ、および省力化にともなう自動化のニーズが高まった結果、モデル構築、制御理論の適用がこの分野で著しく進展した。

加熱帯における伝熱経路は、燃料ガスの燃焼→ラジアントチューブ→鋼板であり、ラジアントチューブ温度、燃料ガス流量、燃焼用空気流量などの PID フィードバック (FB) 系と、処理鋼板の材料特性→板温→炉温間のモデル式を組み合わせることで板温を制御することが一般的であった。加熱帯モデルの基本式は、ラジアントチューブと板を対向する無限平面と考えると、次式で表される。¹⁾

$$CS \cdot \rho \cdot d \cdot (dT_S/dt) = \phi CG \cdot \sigma \cdot (T_S^4 - T_F^4) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、CS：比熱、 ρ ：板密度、 d ：板厚、 ϕCG ：総括熱吸収率、 σ ：ステファンボルツマン定数、 T_S ：板温、 T_F ：炉温、 t ：時間

PID フィードバック制御の応答改善のため、直接板温→燃料流量の関係を線形モデルで表現し、系のパラメータを同定しつつフィードバック制御する適応制御や、詳細伝熱モデルを用いて、板温偏差を評価関数として燃料流量設定値を求める最適制御が、千葉製鉄所

* 平成11年6月2日原稿受付

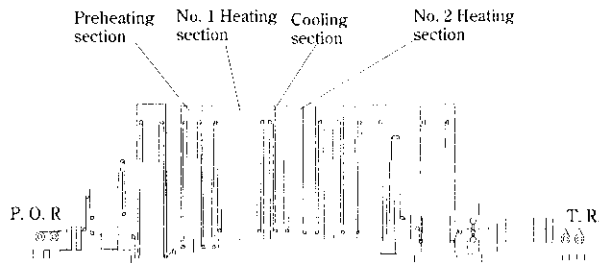


Fig. 1 Layout of No. 3 CAL at Chiba Works

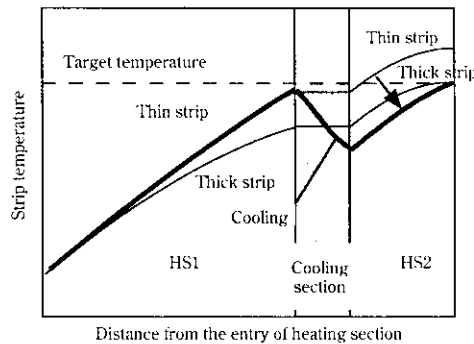


Fig. 2 Function of cooling section

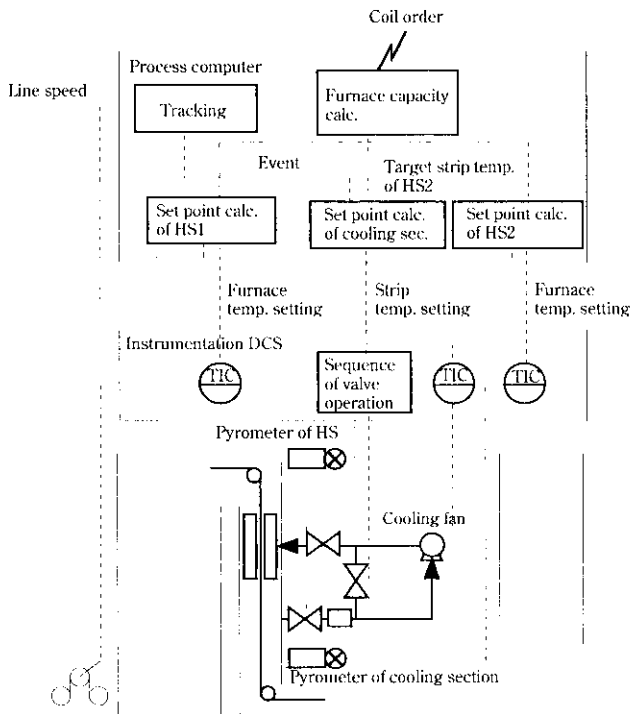


Fig. 3 System configuration of temperature control

第3連続焼鈍設備（千葉3CAL）、水島2CALにて適用されている。

これらの制御だけでは応答の遅いラジエントチューブ加熱自体の応答改善とはならないため、千葉3CALでは、Fig. 1に示すように中間冷却帯を設けることにより一層高精度な温度制御を実現した。これは、昇温途中でガスジェット冷却を行い、この応答の速い冷却量を操作することにより加熱帯出側の温度を高応答に制御するものである。同一板温目標値で板厚が厚→薄に変わる場合、応答の遅い加熱帯では薄物通過時に板温が下がりきらないために、板温が高め

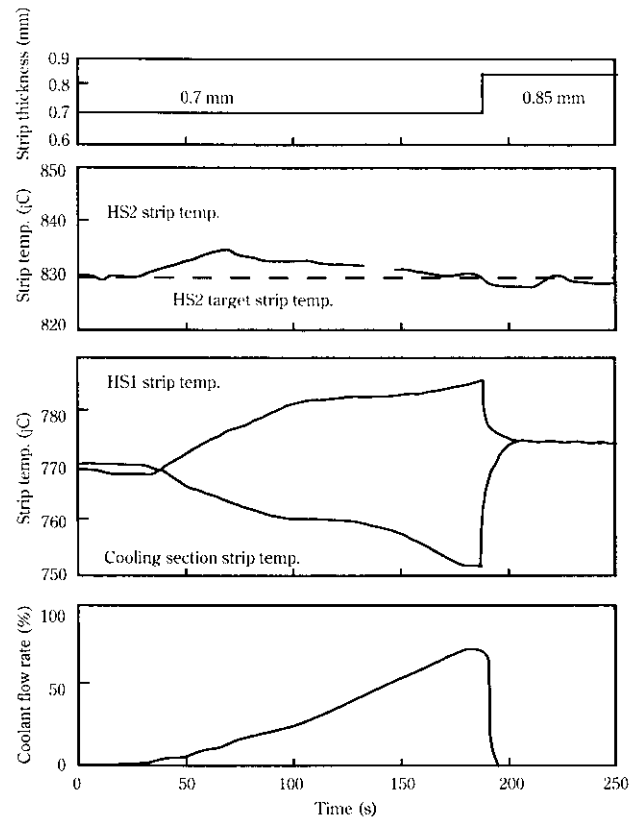


Fig. 4 Result of temperature control

に外れるケースが発生していた。このため Fig. 2 に示すように、中間冷却帯で過熱傾向となる薄物先端部の冷却を行い、板温を一定に保つ。また、薄物→厚物に変更する場合は、薄物であらかじめ高めに板温設定しておき、薄物での過熱外れ分を中間冷却帯で冷却し、厚物通過で冷却を停止することで板温を一定に維持する。

中間冷却帯は Fig. 3 に示す冷却ファン（可変速）とともに、水冷式ガスクーラー、冷却チャンバ、開閉ダンパとこれらをつなぐダクトからなっている。各開閉ダンパは、冷却開始/停止の切替時間の短縮目的で設けられた。

Fig. 3 に示す板温制御のポイントは、冷却後の昇温代を伝熱モデルにより求め、中間冷却帯出口板温を計算し、下位計装 DCS に設定する点にある。伝熱モデルは、前述の加熱帯で使用する輻射伝熱の(1)式である。通常、出口板温は処理材特有の板温目標、板厚によって決まるため、つなぎ目の前後で突変する。中間冷却帯では、設定変更前に循環系を使用し、冷却ファン回転数をあらかじめ所定の値としておき、ダンパを鋼板のトラッキングに基づいて操作し、冷却を開始/停止させることにより、応答時間の短縮を図った。

Fig. 4 に板温制御の効果を示す。HS1、2の炉温変更と中間冷却帯での冷却によって板厚変更時の温度変動の改善が図られた。

3 めっき設備およびコーティング設備の付着量制御

めっき設備では、めっき付着量の均一化や付着量外れの防止などを目的として付着量制御システムが適用されている。ここでは物理モデルを適用し高精度な付着量制御を実現した、溶融亜鉛めっき設備 (CGL) のめっき付着量制御システムと、多目的塗装設備 (MCL) におけるロールコーターによる付着量制御システムについて紹介する。

3.1 CGL のめっき付着量制御³⁾

CGL では焼鈍後の鋼板を溶融亜鉛ポットを通過させ、鋼板とともに持ち上がる溶融亜鉛量をガスワイピング装置で制御する。

Fig. 5 は付着量制御システムの構成で、付着量制御の操作端としてはワイピングノズルのガス圧力と位置の 2 種類である。本付着量制御の特徴は以下の 2 点である。

(1) 2 次元噴流理論にもとづく次式の物理モデルを適用した。

・展開領域 ($D/B \leq C$)

$$M = a1 \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta}} \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{\frac{\mu_{zn} \cdot LS}{\left(\frac{P}{P_A}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

・完全発達領域 ($D/B > C$)

$$M = b1 \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta}} \cdot \frac{D}{\sqrt{B}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_{zn} \cdot LS}{\left(\frac{P}{P_A}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 M : 付着量、 η : ノズル効率、 D : ノズルと鋼板との距離、 μ_{zn} : 溶融亜鉛粘度、 LS : ライン速度、 P : ワイピングガス圧力、 P_A : 大気圧、 κ : 気体比熱比、 B : ノズルスリットの間隔、 $a1, b1, C$: 定数

(2) ノズル-鋼板間距離を距離計で実測した。

Fig. 6 は本制御適用後のコイル先端部の付着量制御精度である。本付着量制御システムを適用することで高精度な制御が実現できた。

3.2 MCL の付着量制御⁴⁾

MCL ではロールコーターを用いてめっき鋼板上に樹脂などを塗

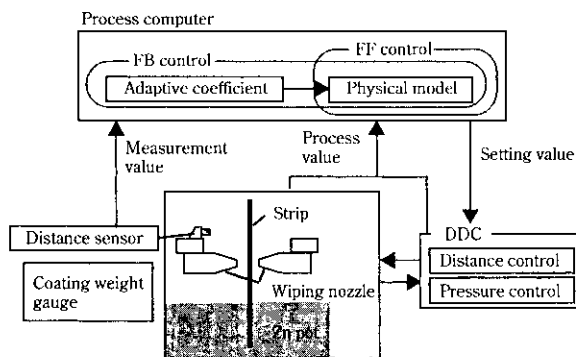


Fig. 5 System configuration of coating weight control at CG

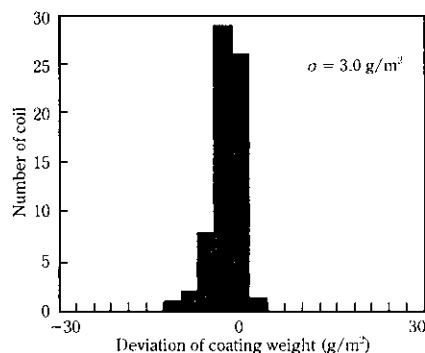


Fig. 6 Distribution of coating weight at the leading-end of coils

装する。Fig. 7 はロールコーターによる付着量制御システムの構成図である。

付着量の制御因子はピックアップロールの周速 V_p 、アプリーターロールの周速 V_A 、ピックアップロールとアプリーターロール間の押し付け力 N_p (以下ニップ圧)、アプリーターロールと鋼板間の押し付け力 N_A の 4 因子である。本付着量制御は弾性流体潤滑理論を応用した次式をプリセットモデルに適用したことが特徴である。

$$M = \frac{3.1c\gamma\mu^{0.6}}{LS} \left\{ \frac{\alpha \left(\frac{V_A}{V_p}\right)^\beta}{1 + \alpha \left(\frac{V_A}{V_p}\right)^\beta} \left(\frac{N_p}{L}\right)^{-0.2} E_{PA}^{-0.4} R_{PA}^{0.6} \times \left(\frac{V_p + V_A}{2}\right)^{1.6} - \lambda \left(\frac{N_A}{W}\right)^{-0.2} E_{AS}^{-0.4} R_{AS}^{0.6} (V_A - LS)^{1.6} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{2}{E_{PA}} = \frac{1 - \nu_p^2}{E_p} + \frac{1 - \nu_A^2}{E_A} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{2}{E_{AS}} = \frac{1 - \nu_p^2}{E_s} + \frac{1 - \nu_A^2}{E_A} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$R_{PA} = R_p R_p / (R_p + R_A) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$R_{AS} = R_A R_s / (R_s + R_A) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 c : 塗料濃度、 γ : 塗料比重比、 μ : 粘度、 L : ロール面長、 W : 板幅、 E_p, E_A : ピックアップロール、アプリーターロールヤング率、 ν_p, ν_A : ピックアップロール、アプリーターロールポアソン比、 R_p, R_A : ピックアップロール、アプリーターロール半径、 α, β, λ : 定数

Fig. 8 は本制御を適用したときの付着量制御精度を表すために、横軸に目標付着量を 100% としたときの付着量実績を、縦軸に発生頻度をとったグラフである。本制御により十分な付着量精度を得ることができ、品質および操業の安定化に寄与している。

4 安定通板のための張力制御

安定操業を行うためには処理する鋼板の通板中の張力を適切に制

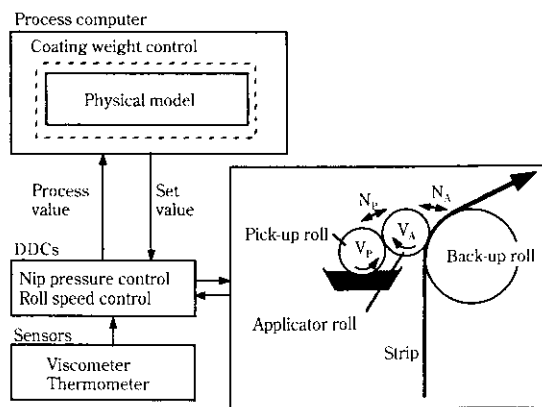


Fig. 7 System configuration of coating weight control at MC

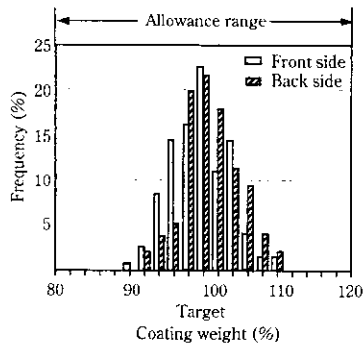


Fig. 8 Distribution of coating weight with feedforward control

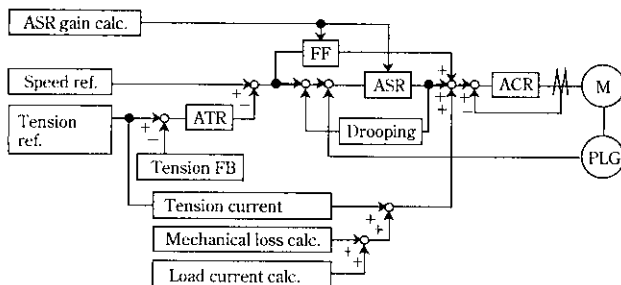


Fig. 9 Newly developed control system of roll-drive for tension control

御する必要がある。必要な制御レベルは処理内容、設備構成などによって異なるが、最も高度の制御を必要とするのが焼鈍炉内の鋼板の張力制御である。張力変動が発生すれば焼鈍炉内のロールのサーマルクラウンの影響を受け、過張力では鋼板にバックリングが発生し、張力不足ではロールのスリップによるすり疵や蛇行が発生する。また、横型炉ではカテナリーの変動による磁性劣化、形状不良が発生する。それらを防ぐための張力制御の課題は、以下の通りである⁵⁾。

- (1) ライン速度変更時に張力変動を発生させない。
 - (2) 前後セクションの加減速によって昇降するルーパーから張力変動を発生させない。
 - (3) ルーパーから発生した張力変動を炉内へ伝えない。
 - (4) 材料変更ポイントで張力設定を適切に変更する。
- 以下に安定通板のために新たに開発した張力制御技術を紹介する。

4.1 縦型炉の張力制御

千葉 4CAL においては、1000 m/min という世界で最速での炉内安定通板を達成するために、従来にも増した高精度の張力制御が必要であった。それを達成するために高機能ベクトルインバータと低慣性高応答テンションデバイスなどを新たに開発した。この結果、炉内における変動が ± 147 N 以内という、極めて高精度の張力制御を実現した^{6,7)}。

高機能ベクトルインバータの構成を Fig. 9 に示す。

- 機能 1: ドローピングの影響をまったく受けずに加減速を可能とする、FF (feed forward) 加減速電流補償
- 機能 2: 負荷の慣性モーメントに関係なく ASR 応答を常に一定にするための ASR ゲイン自動補償
- 機能 3: 負荷トルク、機械損失トルクなどに必要な電流を直接入力し、速度と電流を同時に制御するダブルリファレンス機能
- これらの 3 つの機能の開発が大きな成果を出した。Fig. 10 に炉速 1000 m/min を達成した時の張力を示す。炉速変更時において張

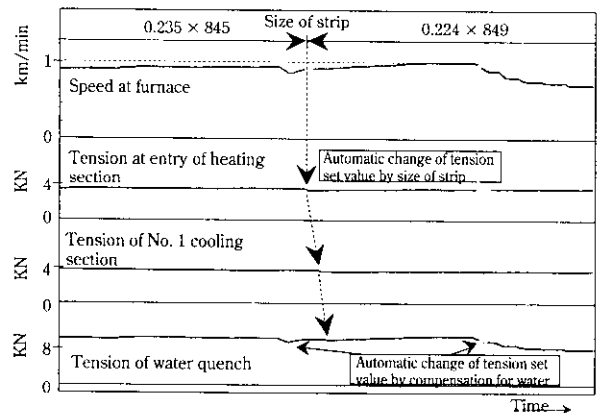


Fig. 10 Tension chart at the maximum line speed

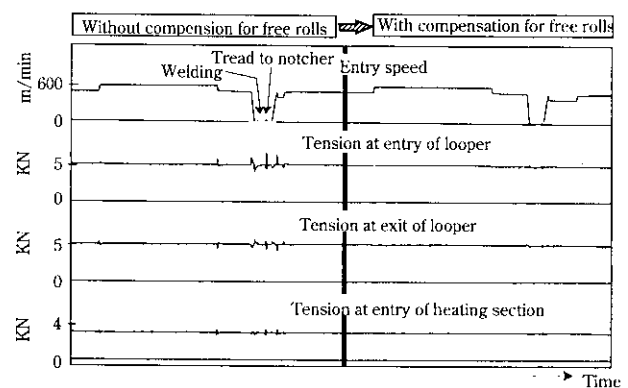


Fig. 11 Tension chart at the looper section and the furnace section, with and without the compensation of inertia of non-drive rolls

力変動は ± 100 N 以内である。これは機能 1 により、加減速に必要なトルクを各モーターが正しく発生できるようになった成果である^{6,7)}。またストリップサイズ変更にもなる張力設定替えが、他セクションの設定替えの影響を受けず、応答が速く、誤差もなく行われている様子がわかる。張力設定値から各ロールが発生すべきトルクを計算し、3 の機能に指令を与えた結果である。速度制御系を経由させず直接トルクで制御できるようになり、応答が速く、外乱の影響も受けなくなった⁵⁾。Fig. 11 には入側セクションのコイルの切り替えにもなるルーパー昇降時の張力チャートを示す。炉入口での張力変動が 40% 弱に低減されている様子がわかる。機能 2 を使い、ルーパー内の各駆動モーターが非駆動ロール、ストリップの慣性モーメント分のトルクを出させるようにした成果である⁵⁾。

他方、炉外 (ルーパー) で発生した張力変動を炉内へ伝えないために、低慣性高応答テンションデバイスを炉入側に設置した。これは Fig. 12 に示すように、トルクモーターによるアームスイング式ダンサーロールであり、従来装置に比べてメカニカルロスが 1/20 以内になっている。また、カウンターウェイトを併用し慣性モーメントを最小限に抑えた。Fig. 13 に本テンションデバイスを使用した時の効果を示す。入側の加減速が炉内張力へ及ぼす影響が、 ± 150 N から ± 50 N 以下に軽減されている^{6,7)}。

4.2 横型炉の張力制御

Fig. 14 に水島 8AL の焼鈍炉まわりの機器構成図を示す。中央セクションは、洗浄設備、コーター、乾燥炉、焼鈍炉という順で構成されており、焼鈍炉内にはカテナリーを一定に制御するためのカテ

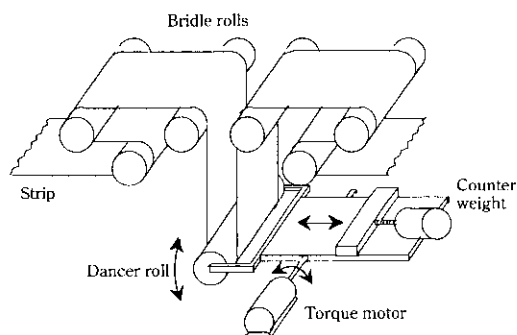


Fig. 12 A newly developed tension device

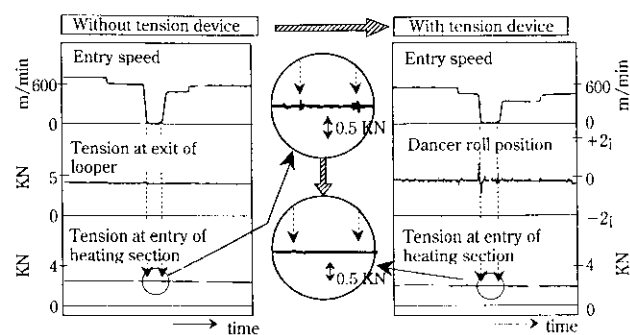


Fig. 13 Tension chart with and without the tension device

ナリーセンサーが、また、5Br 出側には出側セクション追込み時などに発生する張力変動を炉内に伝えないための DR (ダンサーロール) が設置されている。

Fig. 15 に速度、張力制御系統図を示す。通常状態では、SWa, b, c は閉じられた状態となっており、炉内のカタナリーを一定に保つようにハースロール、5Br および 6Br に対してカタナリー制御出力の補正がサクセシブに ASR 系の補正として与えられる。同時に 3TM の ATR (auto tension regulator) 補正も 5Br と 6Br に与えられるが、カタナリー制御出力が上下限のリミッターを越えた場合、SWa 解放となり、カタナリー制御出力の補正は 0 となり、3TM の ATR 補正のみとなる。これは、カタナリーセンサーの誤検出などによる速度、張力制御異常を防止するためである。また、1DL の位置を一定に保つよう 6BrASR 系に補正を与えている。同時に、

SWd の切替により 4TM の ATR が活きるようになっている。これは、1DL 不使用時に 5Br と 6Br 間 (検査セクション) の張力値を保証するためである。

5 結 言

近年の高まる製品品質および安定生産の要求に応えるため、新しい制御技術の開発に取り組み、それらを各設備に適用してきた。今回紹介した焼鈍炉の鋼板温度制御、溶融亜鉛めっきおよび多目的塗装設備の付着量制御、鋼板の張力制御はその一部である。いずれも高品質、高度安定生産に大きく貢献している。今後これらの要求レベルがさらに高まると予想されるが、それに応じて各制御のレベルアップと新しい制御技術や設備の開発に取り組んでいく。

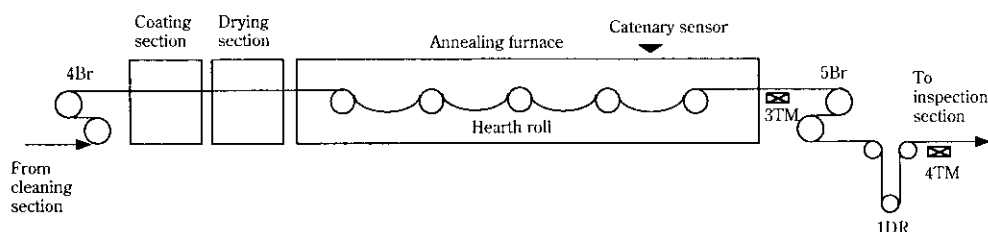


Fig. 14 Layout of center section of No. 8 AL at Mizushima Works

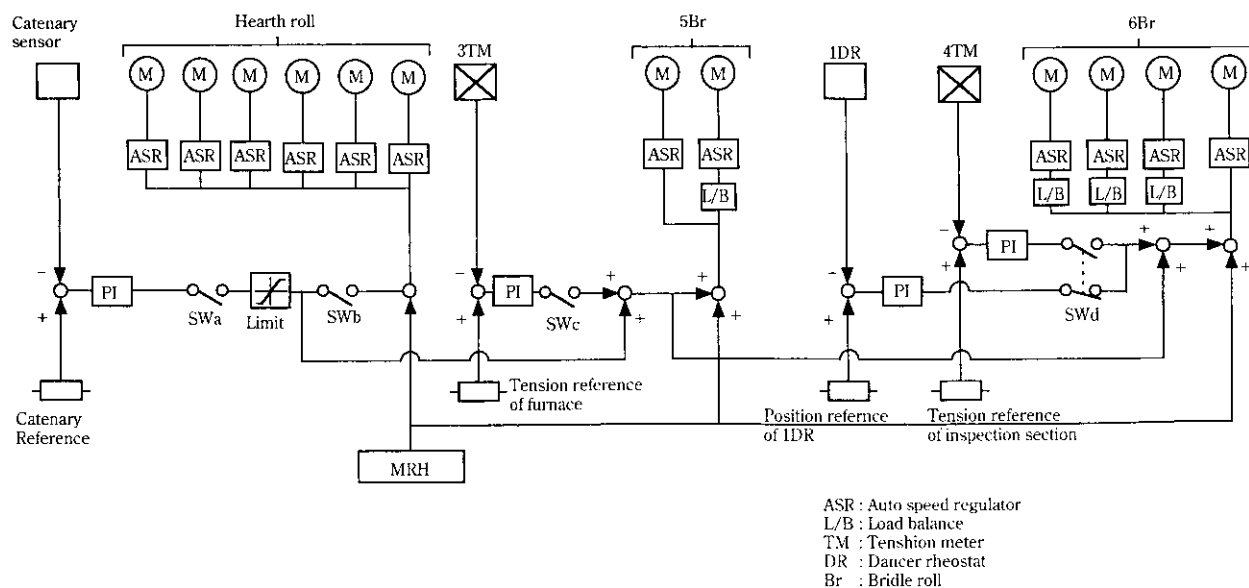


Fig. 15 Control system of roll-drive for tension and speed

参 考 文 献

- 1) 棚澤一郎、西尾茂文、前川 透：「伝熱工学」，(1989)，[朝倉書店]
- 2) 深江重行、女鹿節男、中島康久、藤田健一、芦生浩之、小松富夫：材料とプロセス，**5**(1991)2, 292
- 3) Y. Anabuki, T. Yoshioka, and A. Shinohara: "Coating Weight Control at No. 1 CGL in Mizushima Works", Proc. 1996 AISE Annual Convention
- 4) 田野口一郎、池永孝雄、村上進次郎：川崎製鉄技報，**26**(1994)1, 39-43
- 5) 千野俊彦、市井康雄、池田三郎、清水五雄、飛世正博：「現場技術報告」，鉄と鋼，**79**(1993)9, 129
- 6) 池田三郎、市井康雄、千野俊彦、中村武尚、下山雄二、大野浩伸：材料とプロセス，**4**(1991)2, 598
- 7) 大野浩伸、八角忠明、下山雄二、大西建男、中村武尚、千野俊彦：川崎製鉄技報，**23**(1991)4, 300